

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Акустики та акустoeлектроніки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Дідковський В.С.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) 6.050803 Акустотехніка

(код та назва спеціальності)

на тему: Акустичні сенсори дотику на поверхневих акустичних хвилях

Виконала: студентка 4 курсу, групи ДГ-51

(шифр групи)

Стрижеус Анна Ігорівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник асистент, к.т.н. Нижник О. І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет _____ Електроніки
(повна назва)
Кафедра _____ Акустики та Акустoeлектроніки
(повна назва)
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність (спеціалізація) _____ 171 «Електроніка»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Дідковський В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)
«___» _____ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проект (роботу) студенту**

_____ Стрижеус Анні Ігорівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Акустичні сенсори дотику на поверхневих акустичних хвилях

керівник проекту (роботи) Нижник Олександр Ігорович, к.т.н., асистент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 2019 р. № ____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Дослідити принципи акустичних сенсорів дотику на поверхневих акустичних хвилях

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

1. Вивчити конструкцію сенсорного екрану на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ);

2. Розглянути теоретичні основи поширення ПАХ;

3. Вибрати метод збудження ПАХ;

4. Розрахувати параметри активних елементів сенсорного екрану на ПАХ;

5. Визначити алгоритм знаходження координат точки дотику.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

Презентація у PowerPoint.

6. Консультанти розділів проекту (роботи) [□]

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 10 вересня 2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Видача технічного завдання	10.09.18	виконано
2	Аналіз літературних джерел	01.11.18	виконано
3	Постановка задачі	15.11.18	виконано
4	Підготовка теоретичної частини	15.11.18-20.02.19	виконано
5	Розрахунок перетворювача	20.03.19	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	20.05.19	виконано
7	Підготовка презентації	06.06.19	виконано

Студент

_____ (підпис)

А.І. Стрижеус

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

_____ (підпис)

О.І. Нижник

(ініціали, прізвище)

[□]* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

РЕФЕРАТ

Акустичні сенсори дотику на поверхневих акустичних хвилях // Дипломна робота освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр”. Стрижеус А.І. Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", факультет електроніки, кафедра акустики та акустoeлектроніки, група ДГ-51. - К.: НТУУ “КПІ ім. Сікорського”, 2019. - С. - 51, рис. - 22, табл. - 1.

Метою роботи є дослідження основ розробки акустичних сенсорів дотику, а саме сенсорних екранів з використанням поверхневих акустичних хвиль. Розглянуто основні типи сенсорних екранів, наведено та проаналізовано принципи їх побудови і роботи, проведено їх порівняльний аналіз. Описано особливості конструкції і функціонування сенсорних екранів на поверхневих акустичних хвилях. Розглянуто теоретичні основи поширення хвиль Релея та їх властивості. Розглянуто основні методи збудження акустичних хвиль такого типу та вибрано метод збудження для використання в акустичних сенсорних екранах, проведено відповідні розрахунки. За допомогою методу електроакустичних еквівалентних схем заміщення розраховано параметри ключового елементу акустичного сенсора дотику, а саме - п'єзoeлектричного перетворювача. Приведений алгоритм визначення координат точки дотику до поверхні сенсорного екрану і приклад розрахунку координат дотику.

Ключові слова: *сенсорний екран, хвиля Релея, перетворювач, контролер, поверхневі акустичні хвилі, ультразвук, випромінювач, приймач, відбивач, клин.*

ABSTRACT

Acoustic touch sensor using surface acoustic waves// Degree work of education and qualification level of “bachelor”. Strizheus A.I. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnical Institute", Faculty of Electronics, Department of acoustics and acoustoelectronics, DG-51. - Kiev: “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnical Institute”, 2019. – p. – 51, Fig. – 22, table – 1.

The purpose of the work is to study the basics of the development of acoustic touch sensors, namely, surface acoustic waves touch screens. The main types of touch screens are considered, the principles of their construction and work are presented and analyzed, their comparative analysis is carried out. The features of the design and functioning of touch screens on surface acoustic waves are described. The theoretical foundations of Rayleigh wave propagation and their properties are considered. The basic methods of excitation of acoustic waves of this type are considered and the excitation method for use in acoustic touch screens is chosen, corresponding calculations have been made. Using the method of electroacoustic equivalent circuit, the parameters of the key element of the acoustic touch sensor, namely, the piezoelectric transducer, are calculated. The algorithm for determining the coordinates of the point of contact to the surface of the touch screen and an example of calculating the coordinates of the touch was given.

Keywords: *touch screen, a Rayleigh wave, transducer, controller, surface acoustic wave, ultrasound, transmitter, receiver, reflector, wedge.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РОЗРОБКИ СЕНСОРНИХ ЕКРАНІВ.....	10
1.1. Резистивні СЕ.....	10
1.2. Ємнісні СЕ.....	13
1.3. Проекційно-ємнісні СЕ.....	15
1.4. Оптичні технології.....	17
1.4.1. ІЧ-сенсор с масивом нерухомих оптопар.....	17
1.4.2. ІЧ-сенсор с механізмом розгортки променя.....	17
1.4.3. Оптичні сенсори з використанням відеокамер.....	18
1.5. Висновки.....	19
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СЕНСОРНОГО ЕКРАНУ НА ПАХ.....	20
2.1 Принцип роботи сенсорного екрану на ПАХ.....	20
2.2. Теоретичні основи поширення хвиль Релея та їх властивості.....	25
2.2.1. Рівняння руху, граничні умови, характеристичне рівняння... ..	25
2.2.2. Швидкість, зміщення і напруга ХР	29
2.2.3. Методи збудження і прийому ХР	30
2.3. Визначення координат ТД в сенсорних екранах, що мають активні елементи.....	32
2.4. Визначення координат ТД в сенсорних екранах, що мають лише пасивні елементи.....	34
2.5. Висновки.....	35
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СЕНСОРНОЇ ПАНЕЛІ НА ПАХ.....	36
3.1. Розрахунок швидкостей розповсюдження хвиль в склі.....	36
3.2. Розрахунок клину	37
3.3. Розрахунок п'єзокерамічного перетворювача.....	38

3.4. Алгоритм визначення координат точки дотику	44
3.5. Висновки.....	46
ВИСНОВКИ	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	48
Додаток А.....	50
Додаток Б.....	51

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ХР – хвиля Релея

ІЧ – інфрачервоне випромінювання

К – контролер

ПАХ – поверхнева акустична хвиля

ПК – персональний комп'ютер

ПП – п'єзокерамічний перетворювач

СЕ – сенсорний екран

ТД – точка дотику

ТТ – тверде тіло

УЗ – ультразвук

ВСТУП

У сучасному світі з кожним днем спостерігається все більш стрімкий розвиток електронних технологій, що вимагає створення нових способів взаємодії людини і машини. Іноді використовувати звичайні засоби управління, такі як, мишка або клавіатура незручно, а іноді взагалі неможливо. Тому широке поширення набули сенсорні екрани (СЕ).

В даний час СЕ широко застосовуються в мобільних телефонах, планшетних комп'ютерах та різних інформаційних системах.

Сьогодні найбільшого поширення знайшли такі типи СЕ: резистивний, ємнісний, проекційно-ємнісний, інфрачервоний і на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ).

Сенсорні екрани на ПАХ викликають інтерес тим, що при не високій вартості виробництва поєднують в собі велику кількість переваг перед іншими типами СЕ.

Метою цієї роботи є дослідження принципів побудови сенсорних екранів на ПАХ.

Для цього потрібно опрацювати наступні завдання:

- вивчити конструкцію сенсорного екрану на ПАХ;
- розглянути теоретичні основи поширення ПАХ;
- вибрати метод збудження ПАХ;
- розрахувати параметри активних елементів сенсорного екрану на ПАХ;
- визначити алгоритм знаходження координат ТД.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РОЗРОБКИ СЕНСОРНИХ ЕКРАНІВ

Сенсорний екран - прилад введення, що спрацьовує при торканні пальця або ж ручки, пера, олівця (стилуса) до конкретного місця екрану монітора.

Кожна сенсорна система має три наступних компонента:

- Сенсорний датчик екрану з очищеного скла з поверхнею здатною реагувати. Сенсорний датчик панелі розташовується над екраном так, що реагуюча ділянка панелі покриває видиму ділянку екрану. Дотик до екрану викликає зміну напруги або ж генерації певного сигналу і фіксується відповідними датчиками. Ця інформація застосовується для визначення точки дотику (ТД) до екрану;

- Контролер (К) - це невелика плата, яка з'єднує сенсор і ПК. Він приймає інформацію від сенсорного датчика і перетворює її в інформацію, яку ПК може зрозуміти. К зазвичай встановлюється всередині монітора (для інтегрованих сенсорних панелей) або розташований в пластиковому корпусі (для зовнішніх/накладних сенсорних панелей). К можуть підключатися до СОМ-порт (ПК) або USB-порт (ПК або Macintosh);

- Драйвер - компонент програмного забезпечення для операційної системи ПК, яке дає змогу сенсорному екрану і ПК працювати разом. Він пояснює операційній системі як інтерпретувати інформацію, яка надсилається з контролера [5].

Відомі декілька типів СЕ: резистивний, ємнісний, проекційно-ємнісний, інфрачервоний і акустичний. Кожен із зазначених типів СЕ може так само мати різноманітні варіанти виконання.

Розглянемо основні технології виготовлення сенсорних дисплеїв

1.1. Резистивні СЕ

У резистивному сенсорному екрані застосовують тонкі, гнучкі мембрани, які відокремлені від скляної або пластикової підкладки ізоляційним

шаром. Поверхні підкладки і мембрани мають прозорі металеві покриття, які з'єднуються, коли користувач пальцем або стилусом натискає на екран, тим самим замикаючи електричний ланцюг [6].

Існують чотири- і п'ятипровідні резистивні сенсорні екрани.

Основу конструкції чотирипровідного екрану складають дві прозорі плівки з поліестеру (polyester), майлара (mylar), пластизола (plastisol, PL) або поліетилентерефталату (polyethylene terephthalate, PET), що знаходяться один навпроти одного і розділені мікроскопічними кульками-ізоляторами (рис. 1.1). Внутрішні, обернені один до одного поверхні плівок вкриті прозорим струмопровідним (резистивним) складом на основі двоокису індію та олова (indium tin oxide — ITO) [6].

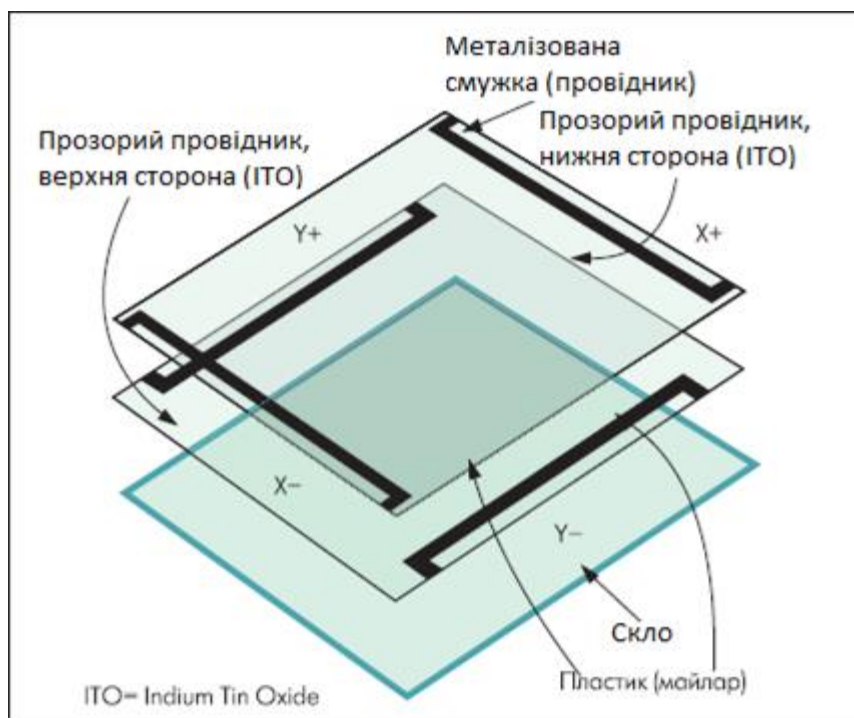


Рис.1.1. Конструкція чотирипровідного резистивного екрану.

Контакт з цими шарами забезпечується за допомогою двох пар металізованих смужок-електродів. Перша пара розташована вертикально, по краях заднього шару, а друга пара - горизонтально, по краях переднього шару. Всі чотири електроди підключені до контролера, який послідовно визначає координати точки дотику по горизонталі і вертикалі [3]. Роботу К в першому

випадку можна описати наступним чином. На вертикальні електроди заднього резистивного шару подається постійна напруга і від одного електрода до іншого протікає деякий струм I . При цьому на кожній горизонтальній ділянці заднього резистивного шару струм створює падіння напруги, пропорційне довжині ділянки [3].

При дотику до екрану передній резистивний шар деформується і торкається заднього шару. В цьому випадку передній шар виконує роль щупа, який визначає напругу на задньому шарі в ТД. Горизонтальні електроди переднього шару замикаються К накоротко (для зменшення впливу опору переднього резистивного шару) і сумарний сигнал надходить через буферний каскад, (який має великий вхідний опір), на аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

Напруга на вході АЦП визначає положення точки дотику по горизонталі. Для визначення координати по вертикалі передній і задній резистивні шари «міняються місцями»: на горизонтальні електроди переднього шару контролер подає постійну напругу, а електроди заднього шару замикає (цей шар використовується як щуп) [3]. Визначення координат точки дотику проводиться К з високою швидкістю - понад сто разів в секунду. Найслабшою ланкою чотирипровідного екрану є передня плівка з поліестеру. Багаторазові деформації призводять до руйнування провідного шару, внаслідок чого зменшується точність визначення координат [3].

П'ятипровідний резистивний екран володіє поліпшеними характеристиками. Переднє резистивне покриття, що піддається деформації при торканні, замінено провідником і використовується винятково в якості щупа, заднє резистивне покриття наноситься не на плівку поліестеру, а на скло (рис.1.2.). Тому до назви п'ятипровідних екранів часто додають аббревіатуру FG (Film on Glass) [3].

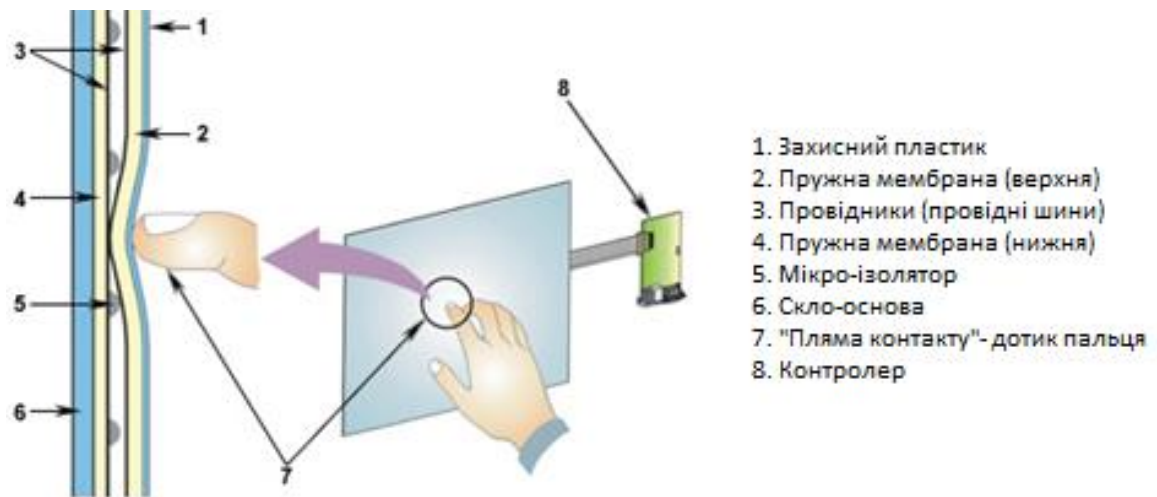


Рис.1.2. Конструкція п'ятипровідного резистивного екрану.

Чотири електрода, які створюють вертикальний і горизонтальний градієнт напружень, знаходяться на задньому резистивному шарі. П'ятий електрод є виводом переднього провідного шару-щупа. Пошкодження цього шару при деформації практично не впливає на точність визначення координат, тому такі екрани більш надійні. П'ятипровідні екрани, на відміну від чотирипровідних, допускають установку на сферичні або циліндричні екрани відображають пристроїв на [3].

1.2. Ємнісні СЕ

Розглянемо пристрій ємнісного екрану. На міцне скло, що служить основою конструкції, нанесений резистивний шар, з'єднаний з чотирма електродами, розташованими по кутах екрану (рис.1.3). Для захисту від пошкоджень цей шар зовні покритий тонкою плівкою зі спеціального матеріалу, що проводить напругу.

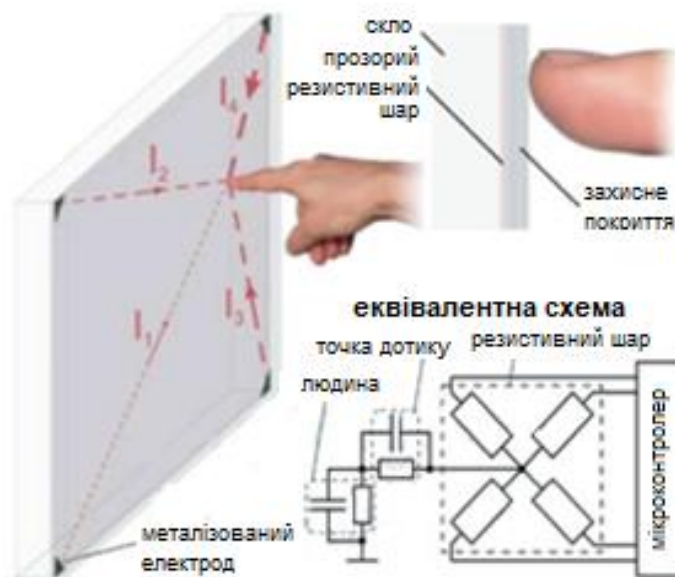


Рис.1.3. Принцип побудови ємнісного екрану.

Всі чотири електроди під'єднані до контролера, який визначає координати ТД, порівнюючи стрибки напруги на чотирьох струмових датчиках або частоти чотирьох ідентичних генераторів, в яких задаючі RC-ланцюги шунтовані змінними ємностями електродів екрану [5]. Розглянемо перший випадок, як найбільш простий. На всі чотири електроди через прецизійні резистори рівних номіналів, що служать струмовими датчиками, К подає напругу, близько декількох вольт. В результаті всі чотири електрода екрану мають однаковий потенціал, тому струм не протікає і не створює на струмових датчиках падіння напруги [3]. Коли екрану, що проводить напругу, торкається людина, ситуація змінюється. Тіло людини проводить струм, а тому зазвичай має потенціал землі - нульовий (мережні і високочастотні завади мають дуже малу амплітуду). При дотику пальцем або будь-яким провідником сенсорного екрану на шарі провідника з'являється точка, потенціал якої менше, ніж потенціали чотирьох електродів, тому виникає електричний струм [3]. Він протікає від джерела живлення, через струмові датчики, ділянки резистивного покриття і тіло людини. Чим ближче точка дотику до електроду, тим менша ділянка резистивного покриття і, отже, менший опір цієї ділянки, а значить - більша амплітуда струму. Для перетворення струму в напругу служать

прецизійні резистори, сигнали з яких подаються на чотири окремих АЦП. Порівняння сигналів на виходах цих АЦП дозволяє визначити координати ТД [3].

1.3. Проекційно-ємнісні СЕ

Проекційно-ємнісні або поверхнево-ємнісні (фірмові назви відповідно - «projected capacitive technology, PCT» і «surface capacitive») [22]. У конструкції застосовується дві системи з вертикальних і горизонтальних електродів, що добре проводять струм, ізолюваних один від одного шаром скла і які утворюють решітку (рис. 1.4).

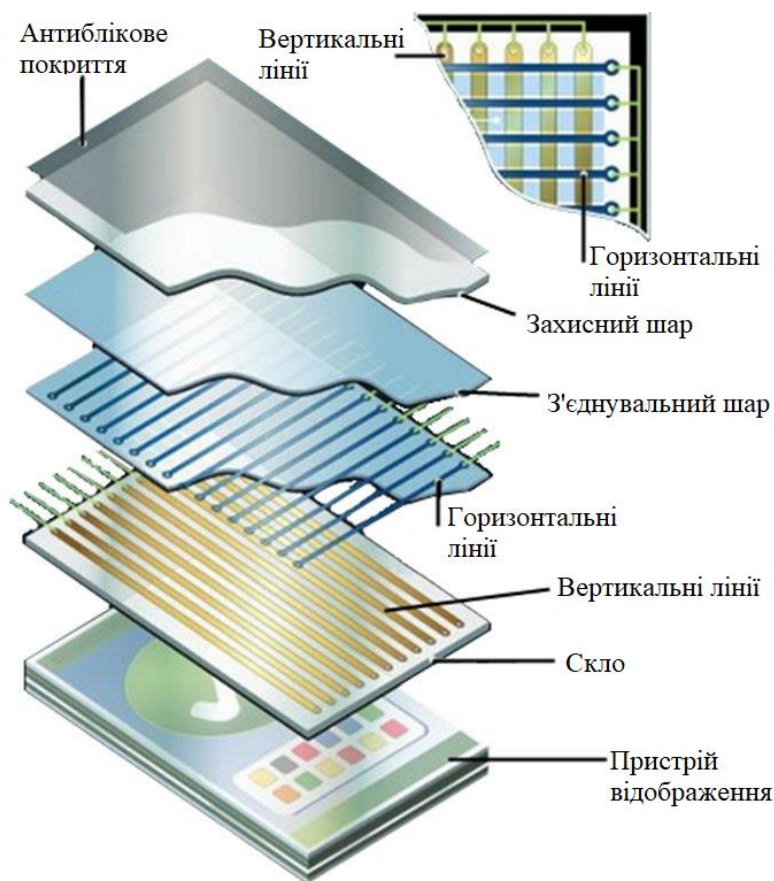


Рис.1.4. Принцип побудови РСТ-екранів.

Кожен електрод, будучи провідником, має деяку електричну ємність. Можна сказати, що в даному випадку ми маємо справу зі своєрідним конденсатором, однією обкладкою якого є сам електрод, а другою - будь-який

предмет що проводить струм, наприклад, людина. Всі горизонтальні електроди (і всі вертикальні) мають однакові розміри, форму і провідність, тому, при відсутності поблизу екрану провідників, їх ємності приблизно рівні [5]. В процесі роботи К посилає короткі імпульси по кожному з електродів. Якщо підвести палець до сенсорної поверхні виникає ефект, аналогічний підключенню конденсатора великої ємності (роль якого в даному випадку виконує тіло людини) до розташованих поблизу електродів. Вимірюючи величину падіння напруги (виникає внаслідок витoku струму через конденсатор), К визначає координати ТД (рис. 1.5) [1].

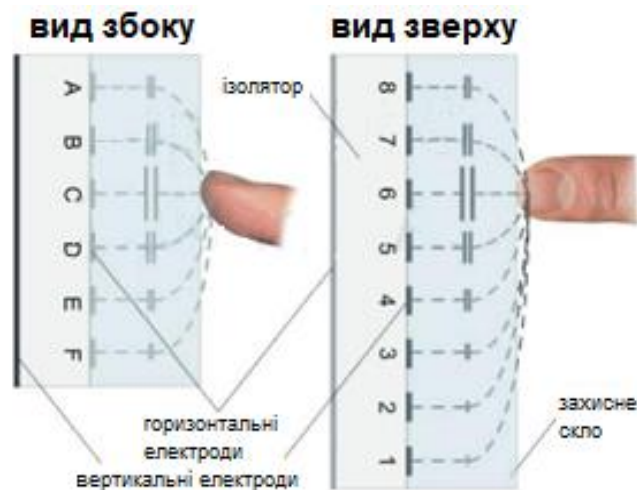


Рис.1.5. Зміна ємності електродів.

Чим ближче електрод розташований до провідного предмету, тим більше його ємність, тому що, як відомо, ємність обернено пропорційна відстані між обкладками; чим більше ємність електрода, тим більший імпульс «заряджаючого» струму. К порівнює ці імпульси і знаходить електрод, який має максимальну ємність - це і є координата ТД [3].

1.4. Оптичні технології

1.4.1. ІЧ-сенсор з масивом нерухомих оптопар

Принцип роботи такого сенсора полягає в тому, що в модулі, що обрамляє екран, з двох сторін розташовані лінійки ІЧ-світлодіодів з фокусуючими лінзами, а на протилежних сторонах - лінійки фотодіодів або фототранзисторів (рис. 1.6). При увімкненні світлодіодів над поверхнею екрана формується невидима сітка, утворена ІЧ-променями. Коли який-небудь предмет наближається до поверхні екрану, він перекриває пересічні в даній точці промені. Відсутність променя фіксується світлочутливими елементами оптопар, за зміною стану яких К визначає координати ТД [6].

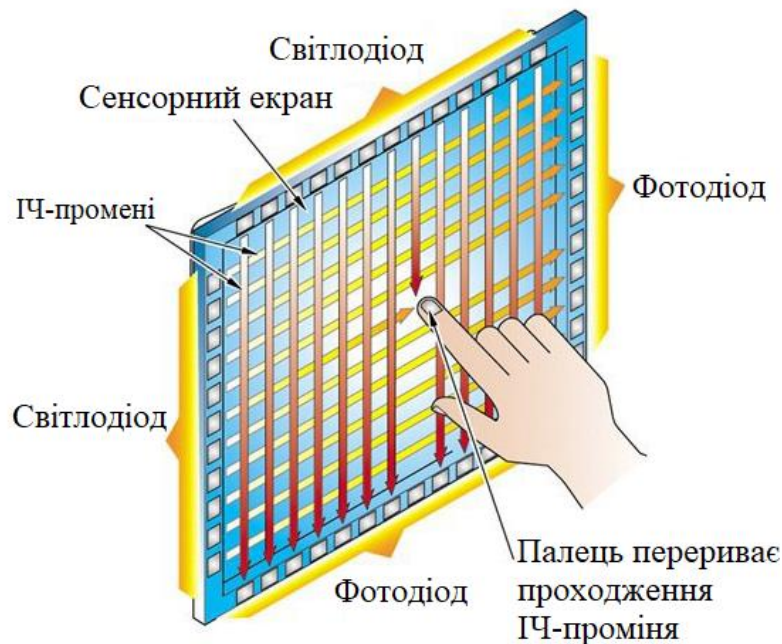


Рис.1.6. Принцип побудови інфрачервоного сенсорного екрану з масивом оптопар

1.4.2. ІЧ-сенсор з механізмом розгортки променя

Замість масиву оптопар використовується одне джерело інфрачервоного випромінювання (світлодіод або напівпровідниковий лазер) і механізм розгортки, який забезпечує рух променя, який з високою швидкістю сканує робочу поверхню. При відсутності перешкоди промінь розсіюється. Якщо ж на шляху променя зустрічається яка-небудь перешкода, то промінь відбивається

від неї і вловлюється фотодіодом. За зміною стану фотодіода контролер фіксує дотик у відповідній точці.

1.4.3. Оптичні сенсори з використанням відеокамер

У пристроях, зображення на екрані яких формується методом зворотної проєкції, може бути використаний оптичний сенсор, реалізований за допомогою цифрової відеокамери. У найпростішому випадку застосовується одна відеокамера, яка працює в ІЧ-діапазоні (рис. 1.7). Зображення на екрані не є перешкодою, оскільки воно проєктується у видимому діапазоні і камера його не сприймає.

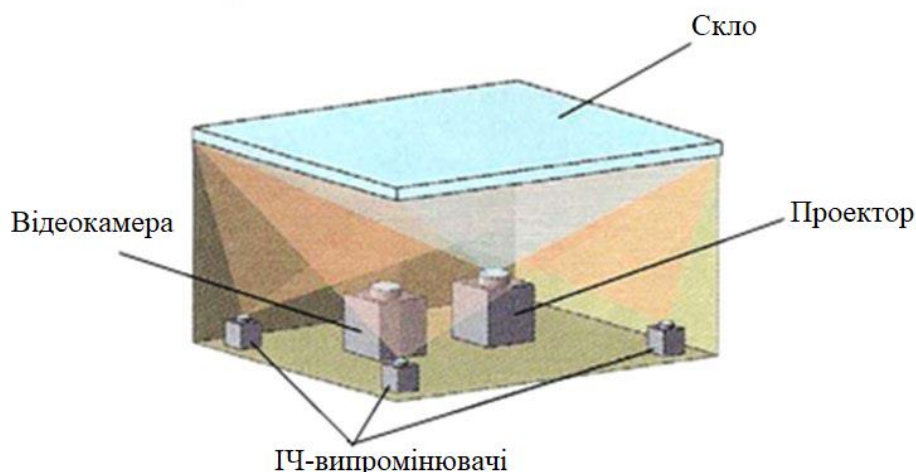


Рис.1.7. Принцип побудови оптичного сенсора з використанням відеокамери.

Внутрішня поверхня екрану підсвічується ІЧ-променями. При відсутності будь-яких предметів на поверхні екрану ІЧ-промені безперешкодно проходять крізь скло. У разі дотику до поверхні промені відбиваються від перешкоди, що з'явилася і відеокамера фіксує пляму (або кілька плям) на однорідному фоні. Отримане зображення обробляється програмним забезпеченням, яке обчислює координати ТД.

Одним з найбільш відомих пристроїв, що використовують дану сенсорну технологію, є Microsoft Surface (рис. 1.8).

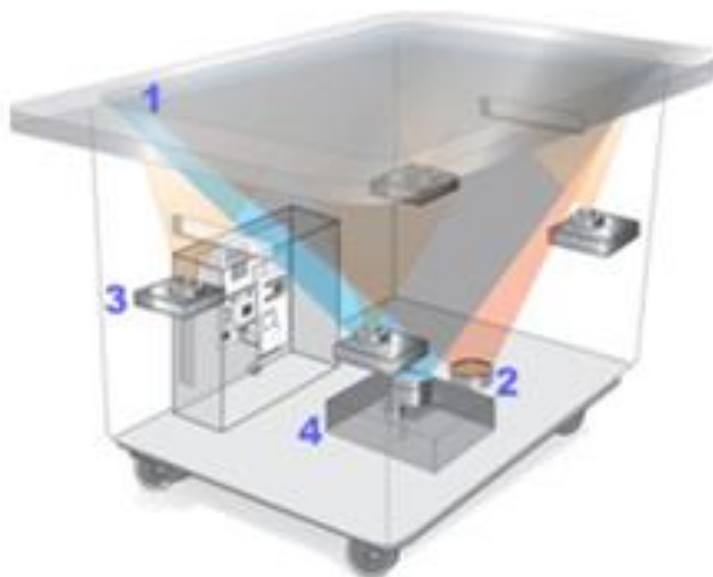


Рис.1.8. Принцип побудови Microsoft Surface:

1 – екран; 2 – камера-детектор; 3 – ПК; 4 – проектор.

Це пристрій являє собою планшетний комп'ютер, виконаний у вигляді звичайного столу, стільниця якого це великий сенсорний екран. Але застосування таких пристроїв найчастіше недоцільно, оскільки вони мають занадто великі габаритні розміри.

Висновки

У розділі було розглянуто основні типи найбільш поширених сенсорних технологій. Проведено аналіз їх конструктивних особливостей та принципу роботи. На даний час серед всіх видів найчастіше використовуються резистивні та проекційно-ємнісні екрани, оскільки вони мають найвищу точність визначення точки дотику. Проте вони мають ряд недоліків, які обмежують сферу їх використання. Сюди можна віднести вартість, складність технології виготовлення та експлуатаційні характеристики. Тут на заміну їм можливе використання сенсорних екранів на поверхневих акустичних хвилях. Переваги і недоліки розглянутих СЕ наведені в Додатку А.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СЕНСОРНОГО ЕКРАНУ НА ПАХ

2.1 Принципи роботи сенсорного екрану на ПАХ

Розглянемо варіанти виконання сенсора на ПАХ.

Початковий варіант виконання, являв собою пристрій, з великою кількістю ПП, електрично з'єднаних паралельно і розташованих уздовж двох суміжних країв листа скла. ПП взаємодіють з поверхнею скла і у відповідь на керуючий сигнал, створюють поверхневі хвилі, які розповсюджуються по всій поверхні листа скла. Стилус, який має п'єзоелектричні компоненти, контактуючи з листом скла, детектує збудження, що поширюються і видає відповідний сигнал на блок управління, який вимірює тривалість інтервалу часу, що пройшов між моментом прикладення керуючого сигналу до датчика, який ініціював збудження, і моментом часу надходження сигналу від стилуса. Недолік такої системи полягає в тому, що вона вимагає розміщення великої кількості ПП на кожній з двох суміжних сторін скляної панелі і використання спеціального стилуса [7].

Наступна розробка відрізняється від попередньої відсутністю стилуса, який детектує звукові хвилі. Хвилі генеруються ПП, розташованими вздовж краю листа прозорого скла, які функціонують як випромінювачі і як приймачі, а, значить, здатні збуджувати поверхневі хвилі і приймати їх. При дотику пальця або стилуса до скла, хвилі відбиваються від них. Датчики пов'язані з лічильником часу, за допомогою якого визначають геометричні координати положення пальця або стилуса. Така система, як і попередня, вимагає розміщення безлічі ПП на кожній з двох суміжних сторін скляної панелі [7].

Згодом була створена модифікація СЕ, подібна ІЧ-сенсорному екрану, але замість світлодіодів і фотодіодів в ній використовують ПП. На двох суміжних сторонах скла розміщують випромінювачі, а на протилежних їм - приймачі. Таким чином, створюється сітка пересічних поверхневих хвиль. Палець або стилус, торкаючись до поверхні, поглинає частину енергії хвиль,

тим самим перериваючи проходження хвилі від випромінювача до приймача. Тому сигнал змінює форму і рівні, на основі чого К обчислює координати ТД. Основний недолік, знову ж таки, полягає в необхідності використання великої кількості ПП [7].

Сьогодні існує кілька найбільш розповсюджених та продуктивних технологій акустичних сенсорних екранів. Перша пов'язана з генерацією та детектуванням ПАХ [3], дві інших – з детектуванням та аналізом сигналів, що генеруються при дотику до сенсорної поверхні [20, 21]. Розглянемо кожну з них окремо.

Перша технологія використовує лише чотири ПП - два випромінювача і два приймача. Вони розташовані по кутах міцної скляної підкладки, яка є основою конструкції (рис. 2.1) [3].

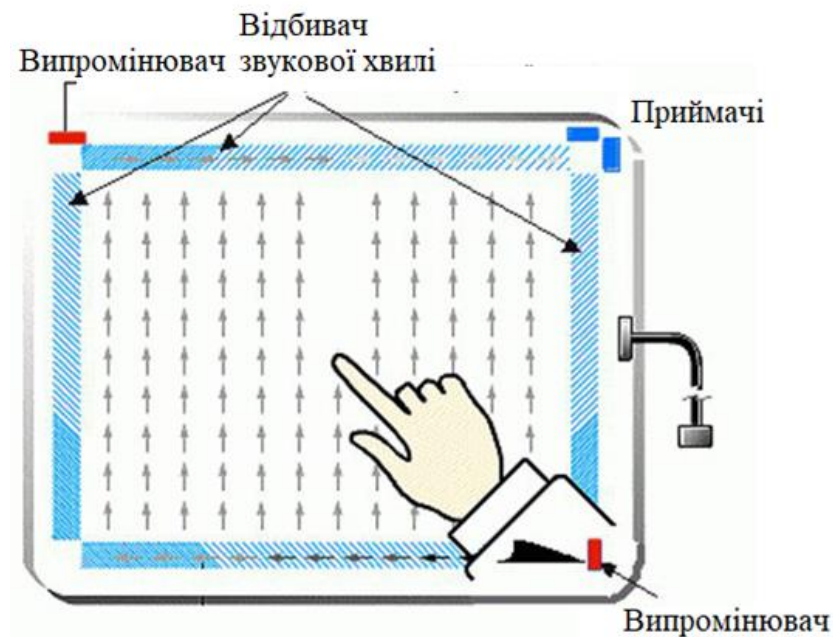


Рис. 2.1. Принцип побудови екрану на ПАХ.

В процесі роботи К подає високочастотний електричний сигнал на ПП, які, в свою чергу, збуджують в скляній пластині поверхневі хвилі УЗ діапазону. Уздовж всіх сторін СЕ нанесені відбивачі ПАХ. Вони являють собою

виступаючі або заглиблені смужки (в залежності від методу нанесення), розташовані під кутом 45 градусів до сторін екрану [4,7,19].

Відбивачі можуть бути виконані методами напилення, травлення або гравіювання. Кожен відбивач, як правило, відбиває близько 1% від енергії ПАХ, розсіює невелику її кількість і дозволяє решті енергії пройти уздовж осі масиву [19]. Таким чином, на елементи масиву, розташовані ближче до випромінюючого перетворювача, буде падати більше акустичної енергії і, отже, більшу кількість енергії вони будуть відбивати. З метою забезпечення рівномірного розподілу енергії ПАХ по поверхні екрану, відстань між відбиваючими елементами може бути зменшено зі збільшенням відстані від випромінюючого перетворювача, що дозволить збільшити коефіцієнт відбиття зі збільшенням відстані від випромінюючого перетворювача. Відстань між відбивачами повинна бути кратна довжині поверхневої хвилі в матеріалі [18, 19]. Потім хвиля падає на приймаючі датчики, які перетворюють її в електричний сигнал, який зчитується К [1].

Коли палець торкається екрану, частина енергії хвиль поглинається. Ці зміни дозволяють визначати координати (X, Y) ТД. Також може бути розрахована вісь Z (глибина або зусилля) сенсорного впливу, оскільки в залежності від сили впливу площа контакту пальця з поверхнею і ступінь поглинання енергії хвилі змінюється, дозволяючи оцінити це зусилля [4].

На рис. 2.2 показана схема з'єднання СЕ з контролером 2701 RSU і ПК.

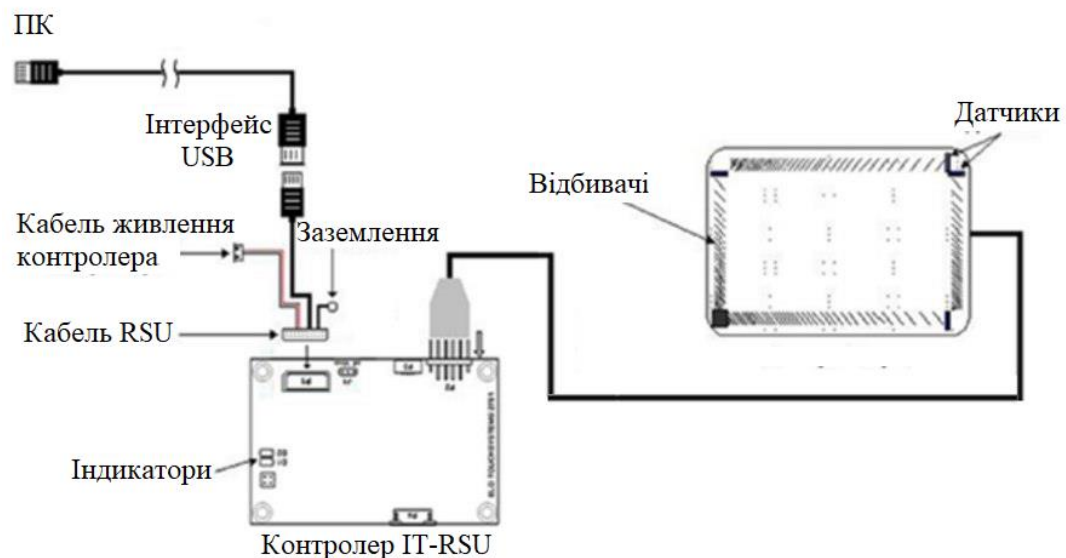


Рис. 2.2. Підключення СЕ до контролера і ПК.

Тепер розглянемо принцип дії технологій, заснованих на детектуванні та аналізу сигналів, що генеруються при дотику до сенсорної поверхні.

Перша з них Dispersive Signal Touch Technology (технологія дисперсійного сигналу) визначає «точку дотику» шляхом вимірювання механічної енергії (хвиль згину) в межах підкладки, створеної пальцем або стилусом, що торкається поверхні сенсору. В цій технології також використовуються лише чотири ПП (рис. 2.3). Коли щось впливає на сенсорний екран, виникають хвилі згину, що розповсюджуються по поверхні сенсорної панелі від місця дотику [20].



Рис. 2.3. Принцип побудови СЕ, що використовує хвилі згину.

При розповсюдженні хвиль згину в матеріалі сенсорного екрану з часом сигнал змінюється через явище дисперсії. Дисперсія - залежність фазової швидкості гармонійних акустичних хвиль від частоти. Імпульс, викликаний контактним дотиком, генерує ряд хвиль згину усередині підкладки, всі з різними частотами. Через «дисперсію» ці хвилі згину поширюються до країв скла з різною швидкістю. П'єзoeлектричні датчики, розташовані в кутах на задній стороні скла, перетворюють цей механічний імпульс в електричний сигнал. Відстань від ТД кожного датчика визначає ступінь зміни сигналу. А саме, чим далі ТД є від датчика, тим більше змінюється сигнал.

Друга має назву Acoustic Pulse Recognition Technology (розпізнавання акустичного імпульсу). Як і в попередньому випадку тут використовується чотири п'єзокерамічні приймачі, розташовані по краях панелі, для перетворення механічних коливань дотиків в електричні імпульси. При дотику генеруються хвилі згину, які детектуються ПП. Сигнали подаються на АЦП в контролері, який аналізує їх форму та час приходу і, знаючи координати кожного з ПП, що розміщені на сенсорному екрані, визначає положення ТД.

Технологія розпізнавання акустичних імпульсів, створена фахівцями компанії Elo TouchSystems, є подальшим розвитком ідеї, використаної в панелях на базі ПАХ. Втім, принцип роботи сенсорних панелей на базі технології APR істотно відрізняється від пристроїв на базі ПАХ. (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Схема сенсорної панелі на базі технології APR

Принцип роботи панелі APR заснований на тому, що звук, який виникає при дотику до кожної з точок сенсорної поверхні, унікальний. При дотику до сенсорної поверхні виникає звуковий імпульс, що поширюється по скляній панелі. Досягнувши краю панелі, імпульс впливає на ПЕП, який перетворює його в електричний сигнал і передає в контролер. Останній порівнює сигнали, що надходять з датчиків, зі збереженими в пам'яті еталонними сигналами, зафіксованими при дотиках до різних точок панелі. При розбіжності звукової картини з еталонами, що зберігаються в пам'яті, контролер не реєструє натискання - таким чином реалізована ефективна система фільтрації зовнішніх шумів і вібрацій.[1]

2.2. Теоретичні основи поширення хвиль Релея і їх властивості

Поверхневі хвилі, що використовуються для побудови ПАХ сенсорів, називають релеївськими або хвилями Релея (ХР) [14, 18].

Ці хвилі були вперше досліджені в 1887 р Релеєм, який показав, що їх дія швидко згасає з глибиною і що швидкість їх поширення менше швидкості хвиль всередині тіла [12]. ХР найбільш часто зустрічаються на практиці і є найпростішими поверхневими хвилями з вертикальною поляризацією і поширюються уздовж межі твердого тіла з вакуумом або досить розрідженим газовим середовищем. ХР локалізована в поверхневому шарі товщиною $\lambda_R - 2\lambda_R$. [8].

Розглянемо основні співвідношення, що описують поширення ХР і їх властивості.

2.2.1. Рівняння руху, граничні умови, характеристичне рівняння

Розглянемо поширення гармонійної (залежність від часу відповідно до множнику $e^{-i\omega t}$) ХР з частотою ω уздовж плоскої межі однорідного ізотропного ідеально пружного напівпростору з вакуумом. Нехай напівпростір займає область $z > 0$ (рис. 2.5) [10].

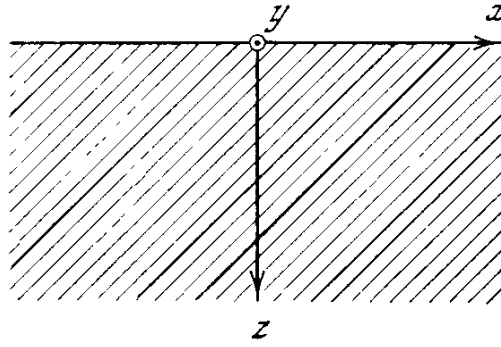


Рис. 2.5. Твердий напівпростір

$$\rho \frac{d^2 U}{dt^2} = \mu \Delta U + (\lambda + \mu) \text{grad}(\text{div} U). \quad (2.1)$$

Тут U - вектор зміщення частинок середовища; ρ - густина; λ і μ - пружні сталі (параметри Ламе) середовища; Δ - оператор Лапласа. Подамо вектор зміщення у вигляді

$$U = U_l + U_t, \quad (2.2)$$

де $U_l = \text{grad } \varphi$; $U_t = \text{rot } \psi$; φ і ψ — так звані скалярний і векторний потенціали відповідно (з векторного аналізу відомо, що таке подання завжди можливо). Підставляючи вираз (2.2) в рівняння (2.1) [13], зведемо це рівняння до двох незалежних рівнянь:

$$\rho \frac{d^2 U_l}{dt^2} - (\lambda + \mu) \Delta U_l = 0, \quad (2.3)$$

$$\rho \frac{d^2 U_t}{dt^2} - \mu \Delta U_t = 0. \quad (2.4)$$

Перше з них описує поширення поздовжніх, друге - поперечних хвиль. Поздовжні хвилі - безвихорові ($\text{rot} U_l = 0$), а в поперечних відсутня об'ємне стиснення і розширення ($\text{div} U_t = 0$) [10].

Розглянемо плоску ХР, що поширюється в додатньому напрямку осі X уздовж границі напівпростору з вакуумом (див. рис. 2.5). У цьому випадку рух не залежить від координати y і у векторного потенціалу буде відмінна від нуля тільки компонента по осі Y . Цю компоненту позначимо як ψ . Для плоскої гармонійної хвилі рівняння руху (2.3), (2.4) будуть задовольнятися, якщо

потенціали φ і ψ є рішеннями двох хвильових рівнянь виду:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{d^2\varphi}{dz^2} + k_l^2\varphi = 0, \quad (2.5)$$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{d^2\psi}{dz^2} + k_t^2\psi = 0. \quad (2.6)$$

Тут $k_l = \omega\sqrt{\rho/(\lambda + 2\mu)}$, $k_t = \omega\sqrt{\rho/\mu}$ — хвильові числа відповідно поздовжніх і поперечних хвиль.

Будемо шукати рішення рівнянь (2.5), (2.6), що відповідають плоскій поверхневій хвилі. Для цього припустимо

$$\varphi = F(z)\exp[i(kx - \omega t)],$$

$$\psi = G(z)\exp[i(kx - \omega t)].$$

Підставляючи ці вирази в рівняння (2.5), (2.6), отримаємо два лінійних диференціальних рівнянь для функцій $F(z)$ і $G(z)$:

$$\frac{d^2F(z)}{dz^2} - (k^2 - k_l^2)F(z) = 0,$$

$$\frac{d^2G(z)}{dz^2} - (k^2 - k_t^2)G(z) = 0.$$

Лінійно незалежними розв'язками кожного з рівнянь є функції, відповідно, $\exp(\pm\sqrt{k^2 - k_l^2}z)$ і $\exp(\pm\sqrt{k^2 - k_t^2}z)$. Припустимо, що $k^2 > k_t^2 > k_l^2$. Тоді рішення з додатними радикалами в експоненті будуть відповідати експоненціально наростаючому з глибиною руху, а рішення з від'ємними радикалами - експоненціально спадаючому, тобто поверхневій хвилі. Таким чином, вирази для φ і ψ набувають вигляду

$$\begin{aligned} \varphi &= A\exp[-qz + i(kx - \omega t)], \\ \psi &= B\exp[-sz + i(kx - \omega t)], \end{aligned} \quad (2.7)$$

де $q = \sqrt{k^2 - k_l^2}$, $s = \sqrt{k^2 - k_t^2}$, A і B — довільні сталі.

Згідно співвідношенню (2.2) компоненти зміщення частинок у хвилі по осях X і Z виражаються через потенціали φ і ψ наступним чином:

$$\begin{aligned} U_x &= \frac{d\varphi}{dx} - \frac{d\psi}{dz}, \\ U_z &= \frac{d\varphi}{dz} + \frac{d\psi}{dx}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Використовуючи лінійний зв'язок між тензором деформацій і тензором напружень (закон Гука) в пружному середовищі і співвідношення (2.8), можна подати через φ і ψ і компоненти T_{xx} , T_{zz} , T_{xz} тензора напружень:

$$\begin{aligned} T_{xx} &= \lambda \left(\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{d^2\varphi}{dz^2} \right) + 2\mu \left(\frac{d^2\varphi}{dx^2} - \frac{d^2\psi}{dx dz} \right), \\ T_{zz} &= \lambda \left(\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{d^2\varphi}{dz^2} \right) + 2\mu \left(\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{d^2\psi}{dx dz} \right), \\ T_{xz} &= \lambda \left(2 \frac{d^2\varphi}{dx dz} + \frac{d^2\psi}{dx^2} - \frac{d^2\psi}{dz^2} \right). \end{aligned} \quad (2.9)$$

На межі $z = 0$ напівпростору з вакуумом напруження T_{zz} и T_{xz} повинні обертатися в нуль. Підставляючи вирази для φ і ψ в ці умови, отримаємо систему лінійних однорідних рівнянь відносно довільних сталих A і B :

$$\begin{aligned} \left[k^2 \frac{\lambda}{2\mu} - q^2 \left(1 + \frac{\lambda}{2\mu} \right) \right] A + iksB &= 0, \\ 2iksA + (k^2 + s^2)B &= 0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Умовою існування рішення цієї системи є рівність нулю її визначника $F(k)$. Це дає наступне характеристичне рівняння для знаходження хвильового числа k :

$$F(k) = 4k^2 qs - (k^2 + s^2)^2 = 0. \quad (2.11)$$

Це рівняння називають рівнянням Релея; його часто записують в поліноміальній формі

$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8(3 - 2\xi^2)\eta^2 - 16(1 - \xi^2) = 0. \quad (2.12)$$

Тут введені позначення: $\eta = k_t/k = c/c_t$; $\xi = k_l/k_t = c_t/c_l$;

c_t, c_l — фазові швидкості поздовжніх і поперечних хвиль відповідно.

Однак, як зазначено в [10], слід пам'ятати, що рівняння (2.12) - похідне і тому може містити зайві корені в порівнянні з вихідним рівнянням Релея (2.11).

2.2.2. Швидкість, зміщення і напруги ХР

Рівняння (2.12) має шість коренів, значення яких залежать тільки від коефіцієнта Пуассона ν пружного середовища, що розглядається. ХР відповідає корінь η_R , що лежить між нулем і одиницею (надалі індексом R будемо відзначати всі величини, що відносяться до ХР). Можна показати, що для будь-яких значень ν , що відповідають реальним середовищам ($0 \leq \nu \leq 0,5$), рівняння (2.12) має один і тільки один такий корінь, який є одночасно і коренем вихідного рівняння (2.11). Це підтверджує справедливність нашого апріорного припущення і разом з тим доводить можливість існування ХР на вільній границі пружного напівпростору [10].

Наближене вираження для цього кореня наступне:

$$\eta_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu}. \quad (2.13)$$

При зміні ν від 0 до 0,5 фазова швидкість ХР монотонно змінюється від 0,87 до 0,96 C_t . ХР не має дисперсії фазової швидкості, оскільки η_R і C_t не залежить від частоти [13].

Знаючи фазову швидкість ХР, з рівняння (2.10) легко отримати співвідношення між довільними сталими A і B і визначити потенціали φ і ψ (див. вирази (2.7)) з точністю до однієї довільної сталої:

$$\begin{aligned} \varphi &= -A \exp[-q_R z + i(k_R x - \omega t)], \\ \psi &= \frac{2ik_R q_R}{k_R^2 + s_R^2} A \exp[-s_R z + i(k_R x - \omega t)]. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Ці вирази показують, що ХР складається з двох неоднорідних хвиль - поздовжньої і поперечної, які поширюються уздовж межі напівпростору з однаковими швидкостями і загасають з глибиною по законам $\exp(-\sqrt{k_R^2 - k_t^2} z)$ (поздовжня) і $\exp(\pm \sqrt{k_R^2 - k_t^2} z)$ (поперечна). На кордоні ($z = 0$) ці хвилі взаємно компенсують створювані ними напруги.

Обчислюючи з формул (2.14) компоненти зсувів по осях X и Z за допомогою співвідношень (2.8), отримуємо такі вирази:

$$\begin{aligned}
 U_x &= Ak_R [\exp(-q_R z) - \frac{2s_R q_R}{k_R^2 + s_R^2} \exp(-s_R z)] \cdot \exp \left[i \left(k_R x - \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right], \\
 U_z &= Aq_R [\exp(-q_R z) - \frac{2k_R^2}{k_R^2 + s_R^2} \exp(-s_R z)] \cdot \exp \left[i (k_R x - \omega t) \right].
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Компоненти напружень ХР можна обчислити, скориставшись співвідношеннями (2.9) і (2.14) [10].

На рис. 2.6 зображена картина зсувів ХР [2].

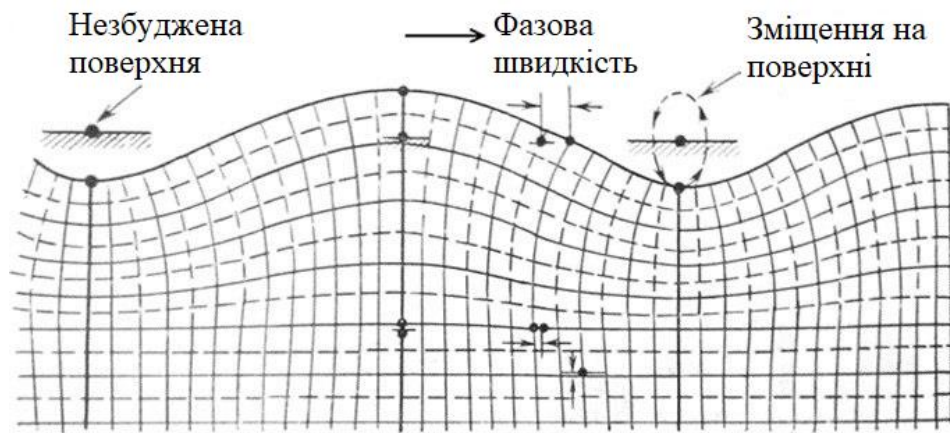


Рис. 2.6. Зміщення в релєївській хвилі

2.2.3. Методи збудження і прийому ХР

Для збудження ультразвукових ХР існує декілька методів. Наприклад, пластина кварцу Х-зрізу, яка спирається на ребро прямокутного пружного клину (рис. 2.7, а), збуджує на його гранях так звані слабкі поверхневі хвилі. Найкраще збудження виходить, якщо грані пластинки нахилені під кутом 45° до площин клину [9].

Можливий так само метод збудження ХР кварцовою пластинкою У-зрізу, що має акустичний контакт з поверхнею твердого тіла (ТТ) за допомогою тонкого шару масла (рис. 2.7, б). Така пластинка збуджує дві ХР, що біжать в від'ємному і додатному напрямках осі Х з однаковими амплітудами. Основна частина механічної енергії пластинки витрачається в цьому методі збудження на випромінювання поперечних ультразвукових хвиль в глиб ТТ.

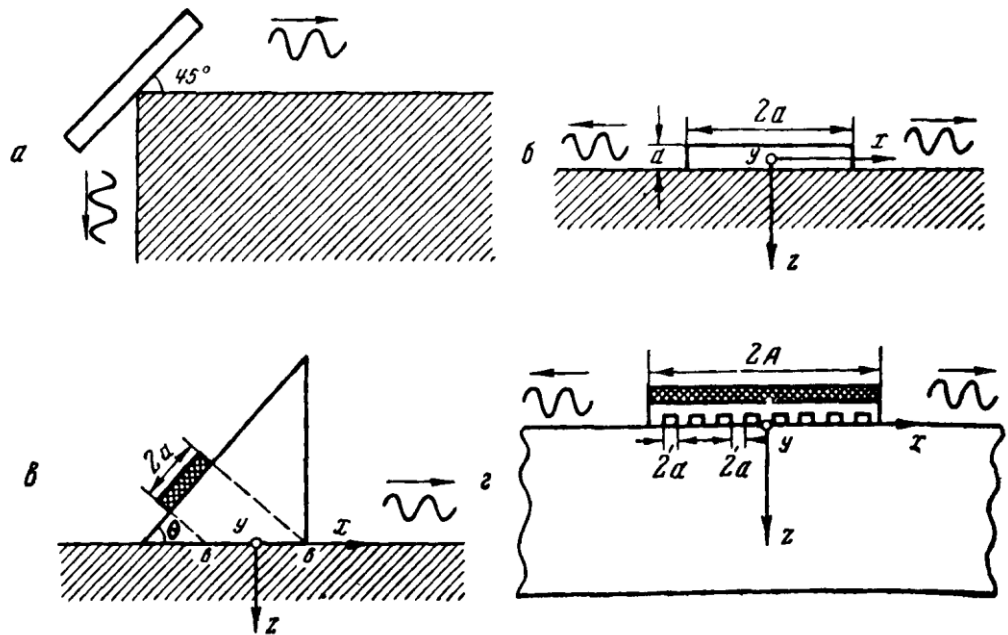


Рис. 2.7. Способи збудження поверхневих ХР.

Найбільш поширеним методом збудження ХР є так званий метод клину, заснований на перетворенні поздовжніх хвиль в релеївські. У цьому методі (рис. 2.7, в) пластмасова призма уздовж однієї своєї межі має акустичний контакт з поверхнею ТТ. На похилій грані призми розташовується п'єзопластина, що випромінює плоску поздовжню хвилю, яка падає під кутом θ на кордон ТТ з призмою. Кут θ обирається з умови оптимального збудження $\sin(\theta_R) = C_{кл} / C_R$, де $C_{кл}$ — швидкість поздовжніх хвиль в матеріалі клину, C_R — швидкість ХР в зразку. Матеріал призми повинен бути таким, що $C_{кл} < C_R$; тому призма робиться зазвичай з пластмаси. При цьому на межі ТТ і призми створюється періодичне збудження з просторовим періодом, рівним довжині ХР в зразку. Оскільки $\theta_R = \arcsin(C_{кл} / C_R)$ більше кута повного внутрішнього відображення як для поздовжнього, так і для поперечної хвиль, що пройшли в зразок хвилі є неоднорідними і збудження загасає з глибиною. Збурюється ХР, що поширюється по поверхні зразка, в додатному напрямку осі X. Найкраще збудження вдається тоді, коли проекція ребра призми на похилу грань збігається з переднім краєм п'єзопластини, як показано на рис. 2.7, в. У методі клину збуджується практично тільки одна ХР, рівень збуджуваних

об'ємних хвиль лежить на 20- 30 дБ нижче [9].

Існує також дещо видозмінений метод клину з трансформацією поперечної хвилі в релеївську. Завдяки меншій (в порівнянні з поздовжньою хвилею) швидкості поперечної хвилі клин в цьому випадку може бути зроблений не з пластмаси, а з металу, наприклад, латуні. Це має ряд переваг: більш проста технологія виготовлення, менша зношуваність, краща можливість узгодження матеріалу клину і зразка (останнє може підвищити ефективність випромінювання і прийому ХР в кілька разів у порівнянні з випадком пластмасового клину) [9].

Можливий метод збудження ХР гребінчастою структурою, що створює на поверхні ТТ (подібно клину) періодичну сукупність нормальних збурень з просторовим періодом λ_R (при відмінності просторового періоду від λ_R збудження менш ефективне). Така структура найпростіше може бути виконана у вигляді металевої пластинки гребінчастого профілю з періодичним чергуванням виступів і пазів шириною $\lambda_R/2$ (рис. 2.7, г) і пластинки кварцу Х-зрізу, що лежить на ній. Гребінчастою структурою можна досить ефективно збуджувати ХР в зразку з будь-якого матеріалу, досить тільки зробити її просторовий період рівним λ_R . В цьому її велика перевага перед методом клину. Недоліком методу гребінчастої структури є високий рівень паразитних сигналів, пов'язаних з випромінюванням структурою об'ємних хвиль [9].

2.3. Визначення координат ТД в сенсорних екранах, що мають активні елементи

Випромінювач працює в імпульсному режимі. Випромінюваний ультразвуковий імпульс породжує на поверхні скла ХР. Хвиля, за допомогою відбивачів, розбивається на частини і рівномірно розподіляється по всій поверхні підкладки. Отже, сигнал, прийнятий приймачем, буде мати вже не імпульсний вигляд, як у випроміненого сигналу, а матиме певну тривалість t_{np} , яка відповідає проміжку часу, від прийому хвилі, що пройшла найменший

шлях по поверхні екрану і прийомом хвилі, що пройшла найбільший шлях по поверхні екрану. Сигнал буде мати вигляд, показаний на рис. 2.6.

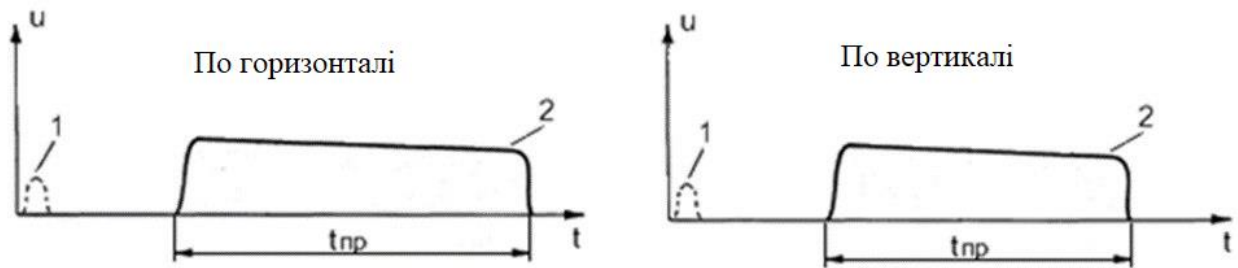


Рис. 2.6. Прийняті сигнали при відсутності дотику.

Коли палець торкається поверхні підкладки, внаслідок поглинання частини енергії поверхневої хвилі спотворюється форма прийнятого сигналу: в момент часу, що відповідає дотику, рівень сигналу зменшується (рис. 2.7). Знаючи швидкість ПАХ на поверхні підкладки і зафіксувавши момент часу, в який з'явилось зниження амплітуди можна визначити координати ТД до поверхні СЕ [7, 19].

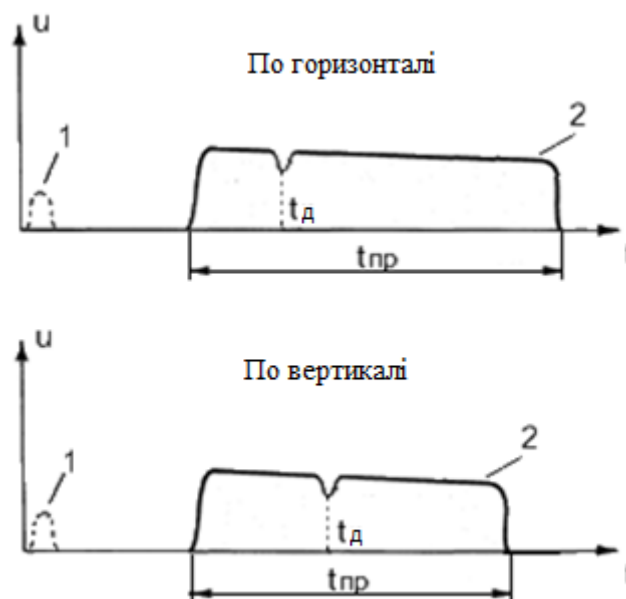


Рис. 2.7. Прийняті сигнали при наявності дотику.

Тривалість ділянки зниження амплітуди сигналу і величина зменшення його рівня залежать від значення сили, яка прикладається до поверхні панелі під час дотику, і від площі дотику. Вимірявши величину зниження рівня

сигналу і тривалість зазначеної ділянки, можна визначити значення сили, з якою торкаються поверхні екрану і розрахувати площу дотику.

2.4. Визначення координат ТД в сенсорних екранах, що мають лише пасивні елементи

З трьох основних розглянутих технологій виготовлення сенсорних екранів дві з них, працюють в пасивному режимі. Одним з алгоритмів визначення ТД є вимірювання часових характеристик сигналу та їх перерахунок у просторіві. Дотик до сенсорної поверхні призводить до збудження акустичних хвиль згину, які розповсюджуються в матеріалі сенсорного екрану і приймаються ПП, які можуть бути розташовані як на бічних сторонах екрану, так і в його кутах. Сигнал, прийнятий ПП матиме форму імпульсу. Розташування ТД розраховується за наступним алгоритмом [23].

Розглянемо систему координат на рис. 2.8, де дотик відбувся в положенні (x, y) . Чотири п'єзоелектричних перетворювача розміщені в положеннях (x_i, y_i) $i = 1, 2, 3, 4$.

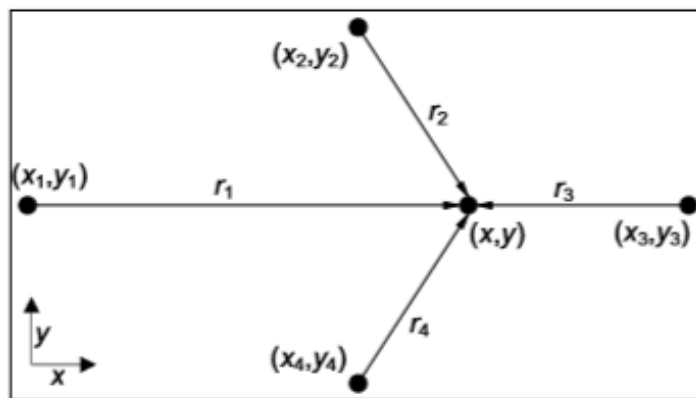


Рис. 2.8. Система координат, що використовується для розрахунку точки дотику

Відстань r_i , яку повинна пройти звукова хвиля, визначається як:

$$r_i = (t + t_i)v, i=1,2,3,4,$$

де t - це час, який потрібен звуковій хвилі для досягнення датчика

зближення, t_i - це різниця в часі між надходженням звуку в датчик зближення і датчиком i , а v - швидкість звуку.

Координати дотику (x, y) , а також t і v можна знайти, вирішивши наступне рівняння [22]:

$$\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}=r_i \quad i=1,2,3,4.$$

Висновки

Існують декілька технологій сенсорних екранів на основі ПАХ. На сьогоднішній день найбільш поширені три з них. Перша пов'язана з генерацією та детектуванням ПАХ (технологія активного виявлення). Технології Dispersive Signal Touch Technology та Acoustic Pulse Recognition Technology пов'язані з детектуванням та аналізом сигналів, зумовлених хвилями згину в матеріалі сенсорного екрану, що генеруються при дотику до сенсорної поверхні (технології пасивного виявлення). У кожній з розглянутих технологій використовуються чотири п'єзоелектричні перетворювачі. Для першої з них два випромінювачі та два приймачі, для інших — лише приймачі. Перша технологія також потребує нанесення спеціальних відбивачів по контуру сенсорної поверхні, необхідних для “сканування” поверхні на наявність дотиків.

Недоліком пасивних технологій виявлення дотику є можлива їх некоректна робота при наявності на сенсорній поверхні сторонніх предметів. Це ускладнює можливість виявлення хвиль, що виникаються при дотику та потребує використання додаткових алгоритмів, що у свою чергу ускладнює розробку сенсорних екранів з використанням вказаних технологій. Тому подальші дослідження та розрахунки проводитимуться для сенсорів, що використовують саме активну технологію виявлення.

З розглянутих методів збудження ПАХ найбільш поширеним є метод клину. Цей метод і буде використовуватись в подальших розрахунках елементів акустичного сенсору.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СЕНСОРНОЇ ПАНЕЛІ НА ПАХ

Проведемо розрахунок сенсорної панелі на ПАХ. Прийmemo, що діагональ робочої області панелі становить 17 дюймів. Панель складається зі скляної підкладки, з нанесеними на нього відбивачами і чотирьох перетворювачів (два приймача і два випромінювача), підключених до контролера. Виберемо частоту поширення хвиль рівної 5 МГц відповідно до рекомендацій, наведених в [3,18,19]. Для збудження ПАХ в склі скористаємося методом клину, як найбільш ефективним і поширеним [9,18]. Вважаємо, що сенсорна панель буде використовуватися і функціонувати під управлінням USB контролера 2701RSU фірми Elo TouchSystems, широко застосовується в сучасних сенсорних ПАХ панелях (див. Додаток Б).

3.1. Розрахунок параметрів хвиль в склі

3.1. Розрахунок параметрів хвиль в склі

В якості середовища поширення хвилі використовуємо скло високого рівня чистоти, фірми «Шотт», типу ВК1, з параметрами [15]:

густина , $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ $2,47 \cdot 10^3$;

коефіцієнт Пуассона, ν $0,21$;

модуль Юнга, $E, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}$ $7.576 \cdot 10^{10}$.

У необмеженому твердому середовищі поширюються поздовжні C_l і поперечні C_t пружні хвилі.

Швидкість для поздовжньої хвилі

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{7.576 \cdot 10^{10}(1-0,21)}{2,47 \cdot 10^3(1+0,21)(1-2 \cdot 0,21)}} = 5876 \text{ м/с}; \quad (3.1)$$

для поперечної хвилі

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{7.576 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 2,47 \cdot 10^3 (1+0,21)}} = 3560,11 \text{ м/с}; \quad (3.2)$$

Скористаємося наближеною формулою для розрахунку швидкості ХР:

$$C_R = \frac{0,87+1,12\nu}{1+\nu} C_t = \frac{0,87+1,12 \cdot 0,21}{1+0,21} 3560,11 = 3252 \text{ м/с}. \quad (3.3)$$

Оскільки хвиля поширюється з частотою 5 МГц, знайдемо довжину хвилі:

$$\lambda_R = \frac{C_R}{f} = \frac{3252}{5 \cdot 10^6} = 0,00065 \text{ м}. \quad (3.4)$$

Енергія хвилі локалізована в поверхневому шарі товщиною до $\lambda = 0,00065 \text{ м}$

3.2. Розрахунок клина

Відповідно до обраного методу збудження ПАХ, вважаємо, що перетворювач розташований на поверхні призми. Призма, розташована на поверхні скла (рис.3.1) [16]:

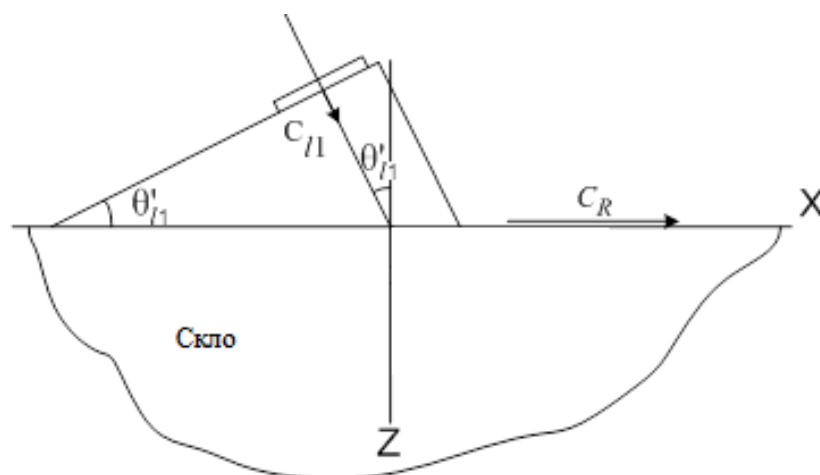


Рис. 3.1. Збудження ПАХ методом клина. θ'_{l1} - кут падіння поздовжньої хвилі в клині, C_{l1} - падаюча поздовжня хвиля; C_R - хвиля Релея.

Клин складається з оргскла з параметрами:

густина, $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$1,19 \cdot 10^3;$
швидкість поздовжньої хвилі, $C_l, \text{м/с}$	$2670;$
швидкість поперечної хвилі, $C_t, \text{м/с}$	$1120.$

Скористаємося законом Снеліуса:

$$\sin \theta'_{l1} = \frac{C_{l1}}{C_R}, \quad (3.5)$$

Отже, кут нахилу призми:

$$\theta'_{l1} = \arcsin \left(\frac{C_{l1}}{C_R} \right) = \arcsin \left(\frac{2670}{3252} \right) = 55,2^\circ.$$

3.3. Розрахунок п'єзокерамічного перетворювача

Перетворювач є однією з найважливіших частин сенсорної панелі на ПАХ, так як з його допомогою здійснюється сканування поверхні підкладки на наявність дотику і збір інформації, яка дозволяє нам розрахувати координати ТД.

В якості активного елементу використовуємо п'єзокераміка ЦТБС-3. Параметри п'єзокераміки ЦТБС-3 [17]:

густина, $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$7,21 \cdot 10^3;$
модулі пружності, $Па$	$\gamma_1^E = 15,1 \cdot 10^{10};$ $\gamma_3^E = 13,6 \cdot 10^{10};$
п'єзомодуль, $d_{33}, \frac{\text{Кл}}{\text{м}}$	$286 \cdot 10^{-12};$
відносна діелектрична проникність, $\frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_0}$	$2090;$
діелектрична проникність вакууму, $\epsilon_0, \Phi/\text{м}$	$8,85 \cdot 10^{-12};$

механічна добротність, Q_i	200;
тангенс кута діелектричних втрат, $\operatorname{tg} \delta$, %	1,2
квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку, K_{33}^2	0,36

Для збудження в склі ПАХ використовуємо ПП стрижневого типу на першій моді коливань. Оскільки в даному випадку випромінюють торці стержня, електроди маємо на двох протилежних гранях. Використовуємо поперечний п'єзоэффект.

Для розрахунку скористаємося методом еквівалентних електромеханічних схем [17].

Розрахунок основних параметрів

3.3.1. Розрахуємо товщину перетворювача виходячи з необхідної частоти 5 МГц [3,18,19], яка дорівнює резонансній частоті перетворювача на 1-й моді коливань.

$$f_{p1} = \frac{C_1^E}{2l} (2 \cdot 1 + 1) = 5 \cdot 10^6 \text{ Гц}, \quad (3.6)$$

де C_1^E - швидкість звуку в п'єзокераміці [17].

Виразимо довжину стрижня через формулу для резонансної частоти:

$$l = \frac{3C_1^E}{2f_{p1}} = \frac{3 \cdot 3100}{2 \cdot 5 \cdot 10^6} = 0,00093 \text{ м}, \quad (3.7)$$

Задамо площу електродів, відстань між ними і площу торця, які не впливають на частоту резонансу

$\delta = 0,00093 \text{ м}$ - відстань між електродами;

$S = 0,002 \cdot 0,015 = 0,00003 \text{ м}^2$ - площа торця;

$S_{el} = S = 0,00003 \text{ м}^2$ - площа електрода.

Загальний вигляд перетворювача зображений на рис. 3.2. Розміри обрані так, щоб ширина УЗ пучка поверхневих хвиль відповідала ширині масиву відбивачів [7, 14].

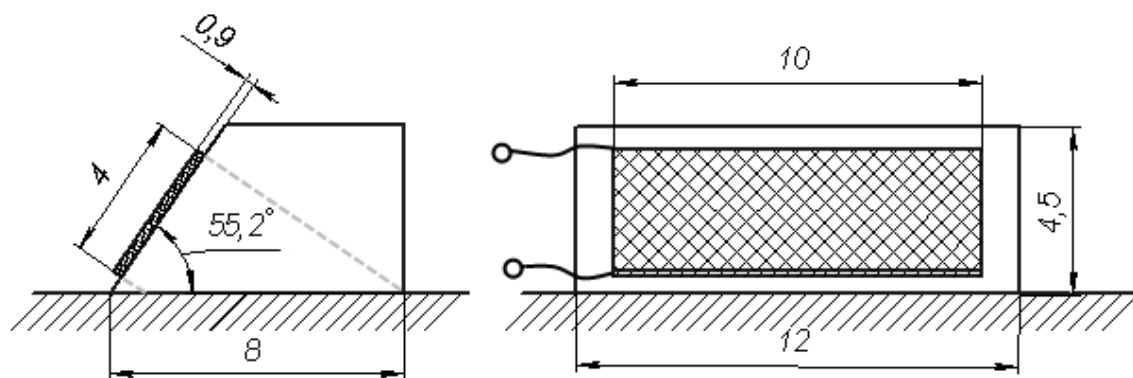


Рис. 3.2 Загальний вигляд перетворювача з призмою.

3.3.2. Знайдемо еквівалентну масу і гнучкість перетворювача

Еквівалентна маса:

$$m_{екв} = \frac{1}{2} \rho l S = \frac{1}{2} \cdot 7,21 \cdot 10^3 \cdot 0,00093 \cdot 0,00003 = 1,006 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \quad (3.8)$$

Еквівалентна гнучкість:

$$C_{екв} = \frac{2l}{\pi^2 Y_1^E S (2i+1)^2} = \frac{2 \cdot 0,00093}{\pi^2 \cdot 15,1 \cdot 10^{10} \cdot 0,00003 \cdot (2 \cdot 1 + 1)^2} = 4,622 \cdot 10^{-12} \text{ м / н} \quad (3.9)$$

3.3.3. Коефіцієнт електромеханічної трансформації

$$n = 2d_{33} Y_3^E \frac{S}{\delta} = 2 \cdot 286 \cdot 10^{-12} \cdot 13,6 \cdot 10^{10} \cdot \frac{0,00003}{0,00093} = 2,509 \quad (3.10)$$

3.3.4. Коефіцієнт електромеханічної трансформації

$$k_{ef}^2 = \frac{8K_{33}^2}{\pi^2 (2i+1)} = \frac{8 \cdot 0,36}{\pi^2 (2 \cdot 1 + 1)} = 0,097 \quad (3.11)$$

3.3.5. Електрична ємність перетворювача

$$C_0 = C_n^T (1 - \kappa_{ef}^2), \quad (3.12)$$

де $C_n^T = \left(\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} \right) \frac{\varepsilon_0 \cdot S_{ел.}}{t_1}$ електрична ємність вільного елемента.

$$C_n^T = \left(\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} \right) \frac{\varepsilon_0 \cdot S_{ел.}}{\delta} = 2090 \cdot \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^{-5}}{0,00093} = 5,967 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \quad (3.13)$$

$$C_0 = C_n^T (1 - \kappa_{ef}^2) = 5,967 \cdot 10^{-10} (1 - 0,097) = 5,386 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \quad (3.14)$$

3.3.6. Опір електричних втрат

$$R_{ев} = \frac{1}{2\pi f_p C_0 \operatorname{tg} \delta} = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 5,386 \cdot 10^{-10} \cdot 0,012} = 4,925 \cdot 10^3 (Ом) = 4,925 \cdot 10^{-7} (с / м). \quad (3.15)$$

3.3.7. Опір механічних втрат

$$r_{мв} = \frac{\omega_p m_{екв}}{Q_m} = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 2\pi \cdot 1,006 \cdot 10^{-4}}{200} = 15,799 \frac{Кз}{с} \quad (3.16)$$

3.3.8. Опір випромінювання стрижневого перетворювача

Виберемо коефіцієнти α і β . Виходячи з хвильових розмірів перетворювача, приймаємо $\alpha = 1$; $\beta = 0$ [17].

$$Z_{вин} = r_{вин} = (\rho c)_c S \alpha = 1,19 \cdot 10^3 \cdot 2670 \cdot 0,00003 \cdot 1 = 95,319 \frac{Кз}{с} \quad (3.17)$$

Вихідні параметри перетворювача

3.3.9. Активна складова механічного опору

$$r_m = r_{мв} + r_{вин} = 15,799 + 95,319 = 111,118 \frac{Кз}{с} \quad (3.18)$$

3.3.10. Реактивна складова механічного опору на резонансній частоті.

Оскільки перетворювач працює на частоті механічного резонансу, $x_m = 0$.

3.3.11. Механічна добротність в робочому середовищі

$$Q_{мп} = \frac{2\pi f_p m_{екв.}}{r_m} = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 1,006 \cdot 10^{-4}}{111,118} = 28,436 \quad (3.19)$$

3.3.12. Вхідний електричний опір Z

$$Z = \frac{R \cdot X \cdot (X - j \cdot R)}{X^2 + R^2}, \quad (3.20)$$

де R и X – відповідно активна і реактивна складові вхідного опору.

Активна складова вхідного опору на резонансній частоті:

$$R_0 = \frac{r_m / n^2}{1 + \frac{r_m}{R_{ен} n^2}} = \frac{111,118 / (2,509)^2}{1 + \frac{111,118}{4,925 \cdot 10^{-7} \cdot (2,509)^2}} = 4,925 \cdot 10^{-7} (с / м) = 4,925 \cdot 10^3 Ом \quad (3.21)$$

Реактивна складова вхідного опору на резонансній частоті:

$$X_0 = \frac{1}{2\pi f_{p1} C_0} = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 5,386 \cdot 10^{-10}} = 59,097 \text{ Ом} \quad (3.22)$$

3.3.13. Коефіцієнти корисної дії

Акустомеханічний ККД:

$$\eta_{a/m} = \frac{r_{\text{вип}}}{r_m} = \frac{95,319}{111,118} = 0,858 \quad (3.23)$$

Механоелектричний ККД на частоті резонансу:

$$\eta_{m/e} = \frac{1}{1 + \frac{r_m}{R_{\text{ес}} \cdot n^2}} = \frac{1}{1 + \frac{111,118}{4,925 \cdot 10^{-7} \cdot (2,509)^2}} = 0,996 \quad (3.24)$$

Акустоелектричний ККД:

$$\eta_{a/e} = \eta_{a/m} \cdot \eta_{m/e} = 0,855 \quad (3.25)$$

3.3.14. Вважаємо, що перетворювач підключається до ПК за допомогою контролера 2701RSU. Напруга, яка подається на перетворювач 5В. Знайдемо активну акустичну потужність, яку випромінює перетворювач в середовище.

$$U = \sqrt{\frac{W_{\text{ак}} \cdot R_0}{\eta_{a/e}}} \quad (3.26)$$

$$W_{\text{ак}} = \frac{U^2}{R_0} \eta_{a/e} = \frac{5^2}{4,925 \cdot 10^3} 0,855 = 4,339 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \quad (3.27)$$

3.3.15. Питома акустична потужність

$$W_{\text{нм}} = \frac{W_{\text{ак}}}{S} = \frac{4,339 \cdot 10^{-3}}{0,00003} = 144,629 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (3.28)$$

3.3.16. Звуковий тиск, що створюється перетворювачем в навколишньому просторі.

$$p = \frac{1}{2 \cdot r} \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot W_{\text{ак}} \cdot (\rho \cdot c)_c \cdot K_k} = \frac{1}{2 \cdot r} \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot 4,339 \cdot 10^{-3} \cdot (2470 \cdot 3252)_c \cdot 892,287} = \frac{1573}{r} \text{ Па} \quad (3.28)$$

де $K_k = \frac{4 \cdot \pi \cdot S_{\text{вип}}}{\lambda^2} = 892,287$ - коефіцієнт концентрації випромінювача; r -

відстань між випромінювачем і точкою в дальній зоні, в якій визначається тиск.

Оскільки сигнал розділяється і проходить різні відстані до випромінювача, то необхідно розрахувати звуковий тиск на приймачі при

максимальній відстані проходження сигналу і мінімальному для напрямків Х і Y.

При перетворенні хвилі з подовжньої (в призмі) в релеївську (в склі) втрачається близько сорока відсотків енергії, такі ж втрати при зворотному перетворенні [11]. Розглянемо випадок повного відбиття, тобто втрати при проходженні хвилею систем відбивачів не враховуємо.

В напрямку Х:

$$p_{\max} = \frac{1573 \cdot 0,6 \cdot 0,6}{r} = \frac{1573 \cdot 0,6 \cdot 0,6}{0,34 + 2 \cdot 0,27} = 643,5 \text{ Па}$$

$$p_{\min} = \frac{1573 \cdot 0,6 \cdot 0,6}{r} = \frac{566,28}{0,34} = 1666 \text{ Па}$$

В напрямку Y:

$$p_{\max} = \frac{1573 \cdot 0,6 \cdot 0,6}{r} = \frac{566,28}{(2 \cdot 0,34 + 0,27)} = 596,084 \text{ Па}$$

$$p_{\min} = \frac{1573 \cdot 0,6 \cdot 0,6}{r} = \frac{566,28}{0,27} = 2097 \text{ Па}$$

3.3.17. Для прийому хвиль використовуємо перетворювач з такими ж параметрами, як і випромінюючий, але працює в режимі прийому. Розрахуємо чутливість перетворювача до звукового тиску в режимі прийому

$$|\gamma| = \left| \frac{U_{xx}}{p} \right| = \frac{n S_{cp} |k_d|}{\omega C_0 \sqrt{r_m^2 + \left(x_m + \frac{n^2}{\omega C_0}\right)^2}} =$$

$$= \frac{2,509 \cdot 0,00003 \cdot 1}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 5,386 \cdot 10^{-10} \sqrt{111,118^2 + \left(0 + \frac{(2,509)^2}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 5,386 \cdot 10^{-10}}\right)^2}} = 1,146 \cdot 10^{-5} \quad (3.29)$$

де S_{cp} – середня площа приймальної поверхні, $k_d = 1$ – коефіцієнт дифракції.

3.3.18. Оскільки носієм інформації про дотик є напруга [7,19], то необхідно передати його від перетворювача до контролера з мінімальними втратами. Отже, вважаємо, що опір К більше внутрішнього опору приймача. В такому випадку приймач працює в режимі холостого ходу [17]. Розрахуємо

напруги холостого ходу U_{xx} при різному звуковому тиску.

В напрямку X:

$$|U_{xx}| = |p_{\max} \gamma| = 643,5 \cdot 1,146 \cdot 10^{-5} = 7,372 \cdot 10^{-3} B; \quad (3.30)$$

$$|U_{xx}| = |p_{\min} \gamma| = 1666 \cdot 1,146 \cdot 10^{-5} = 19 \cdot 10^{-3} B; \quad (3.31)$$

В напрямку Y:

$$|U_{xx}| = |p_{\max} \gamma| = 596,084 \cdot 1,146 \cdot 10^{-5} = 6,829 \cdot 10^{-3} B; \quad (3.32)$$

$$|U_{xx}| = |p_{\min} \gamma| = 2097 \cdot 1,146 \cdot 10^{-5} = 24 \cdot 10^{-3} B; \quad (3.33)$$

Отримані значення напруги будуть відповідати значенням, що виникають на виводах приймального ПП.

3.4. Алгоритм визначення координат точки дотику

Наведемо алгоритм знаходження координат ТД на прикладі екрану, з робочою поверхнею діагоналлю 17 дюймів (0,34м × 0,27м) (рис. 3.4). Зондуючий імпульс випромінюється в момент часу $t = 0$. Розглянемо випадок, коли випромінювачем і приймачем виступають тільки В1 і П1, тобто ПАХ поширюються по поверхні підкладки в горизонтальному напрямку.

Прийом сигналу починається з моменту прийому хвилі, що пройшла найменшу відстань (0,34) по поверхні підкладки і закінчується в момент прийому хвилі, що пройшла найбільшу відстань (0,88 м) по поверхні підкладки.

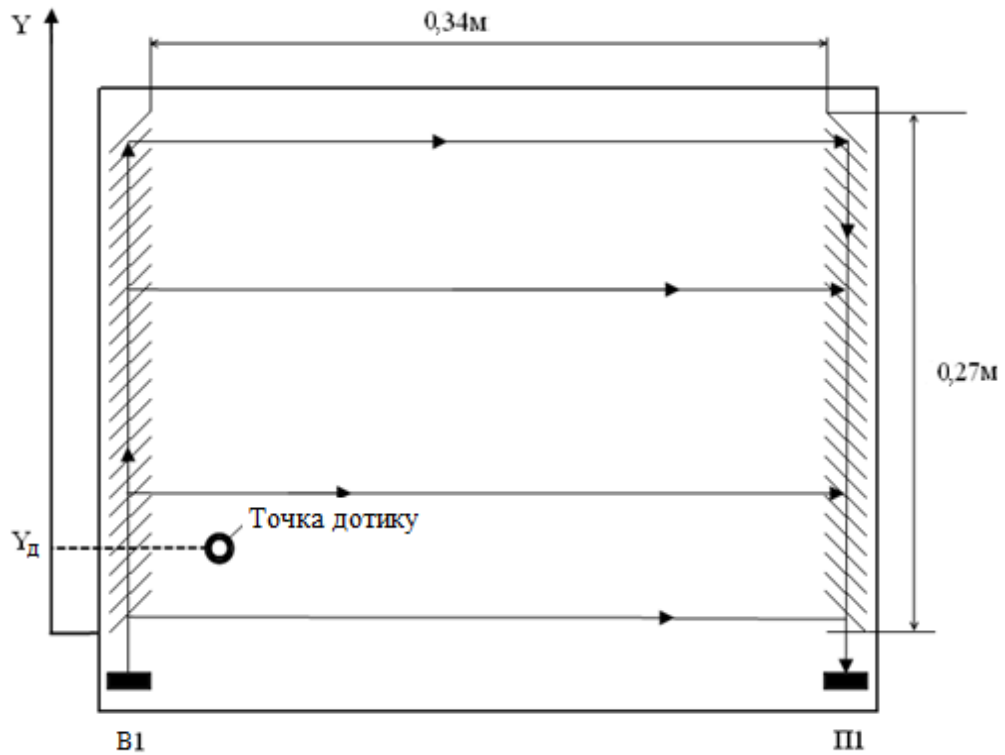


Рис. 3.4. Поширення хвиль по горизонталі.

Отже, тривалість прийнятого сигналу становить:

$$t_{np} = 0,88/C_R - 0,34/C_R = 0,88/3250 - 0,34/3250 = 0,000271 - 0,000105 = 166 \text{ мкс} \quad (3.34)$$

Нехай в момент часу $t_k = 0,127 \text{ мс}$ амплітуда сигналу різко зменшується (рис. 3.5.), що свідчить про наявність дотику, при цьому сигнал на виході приймача буде мати вигляд, як показано на рис. 3.5.

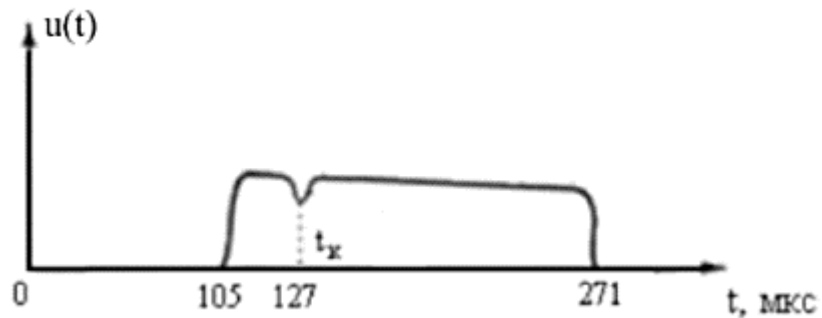


Рис. 3.5. Форма прийнятого сигналу.

Відстань l , пройдена хвилею, прийнятою в момент часу t_k , дорівнює:

$$l = t_k C_R = 0,000127 \cdot 3250 = 0,41235 \text{ м}. \quad (3.35)$$

Шлях, який проходить хвиля по поверхні підкладки, дорівнює сумі пройденої відстані по горизонталі і подвійній відстані по вертикалі. Віднявши з отриманого значення мінімальну відстань і розділивши залишок на два, одержимо значення пройденого шляху по вертикалі, що відповідає координаті Y точки дотику.

$$Y = (l - 0,34)/2 = (0,41235 - 0,34)/2 = 0,0362 \text{ м.} \quad (3.36)$$

Проаналізувавши сигнал, отриманий в результаті прийому хвиль, що поширюються по вертикалі, аналогічним способом можна визначити координату X точки дотику.

Очевидно, що точність визначення координат буде залежати від частоти дискретизації прийнятого сигналу. Чим більше частота дискретизації прийнятого сигналу, тим більше буде точність визначення рівня падіння амплітуди при дотику.

Висновки

На основі розглянутої в попередніх розділах інформації проведено розрахунок одного з ключових елементів активного сенсору на ПАВ, а саме — п'єзоелектричного перетворювача. Вибрано матеріали елементів активного акустичного сенсору на ПАВ та його параметри (скло, тип п'єзокерамічного матеріалу). Для вибраного методу збудження ПАВ розраховано параметри призми, з урахуванням матеріалу сенсорної поверхні. З використанням методу еквівалентних електромеханічних схем проведено розрахунок параметрів п'єзоелектричного перетворювача для генерації та прийому акустичних хвиль. Проведено оцінку якісних характеристик (амплітуда) сигналів, що випромінюються та приймаються перетворювачами акустичного сенсору. Згідно з розглянутим у Розділі 2 методом оцінки координат ТД приведено приклад розрахунку координат ТД для сенсорного екрану заданих розмірів.

ВИСНОВКИ

Відповідно до завдання в бакалаврській роботі вирішені наступні завдання:

- на основі вивчення інформації, наведеної в літературних джерелах [1,3,5,6,7,14], розглянуті особливості найбільш поширених типів СЕ, в результаті чого проведено їх порівняльний аналіз (див. Додаток А);
- розглянуто теоретичні основи поширення поверхневих хвиль Релея, способи їх збудження;
- для побудови моделі сенсорного екрану на ПАХ був обраний спосіб перетворення поздовжньої хвилі в релеївську за допомогою клина. Виходячи з параметрів обраного скла, розрахований кут його нахилу;
- за допомогою методу еквівалентних електромеханічних схем розраховані параметри п'єзоелектричного перетворювача. Отримано значення напруги на виводах приймального перетворювача;
- розглянуто алгоритм знаходження координат точки дотику до поверхні СЕ. Наведено приклад розрахунку координат точки дотику.

СПИСОК ВИКОРИСТОНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Асмаков С. Многообразие сенсорных дисплеев // Компьютер Пресс. – 2010. – №8. – С. 60-67.
2. Фильтры на поверхностных акустических волнах (расчет, технология и применение): Пер. с англ./Под ред. Г. Мэттьюза. – М.: Радио и связь, 1981. – 426 с.
3. Мухин И.А. Сенсорные экраны – решение проблем // BROADCASTING Телевидение и радиовещание. – 2006. – №7. – С.64-66.
4. Патент США. Surface acoustic wave touchscreen sealing system. №5.332.238, C16G 15/32 - 1994 г.
5. Bhalla M.R., Bhalla A.V. Comparative Study of Various Touchscreen Technologies // International Journal of Computer Applications. – 2010. – V.6 – No.8.–P. 12-18.
6. Quinell R.A. Touchscreen Technology // EDN. - 1995.
7. Патент США. Surface acoustic wave touch panel system. №4.644.100, G08C 21/00; G06K 11/06 - 1987 г.
8. Голямина И.П. Ультразвук: Маленькая энциклопедия. - М.: Сов. энциклопедия, 1979. - 400 с., ил.
9. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. – М.: Наука, 1965. – 169 с.
10. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 287 с.
11. Бреховских Л. М., Гончаров В. В. Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн). – М.: Наука, 1982. – 337 с.
12. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. – 192 с.
13. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости. — М.: Наука, 1987. – 248 с.

14. Патент США. Surface acoustic wave touchscreen with housing seal. №5.784.054, B65D 53/00; G09G 5/00; G06F 3/03 - 1998 г.
15. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. Пер. с нем. М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. - 728 с.
16. Дідковський В.С., Найда С.А., Овсяник В.П. Фізична акустика: Навчальний посібник. – К.: НМЦВО, 2009. – 267 с.
17. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). Навчальний посібник. – Кіровоград: "Імекс-ЛТД", 2006. – 448 с.
18. Патент США. Acoustic device using high order harmonic piezoelectric element. №7.000.474, G01N 29/12; H01L 41/18; G09G 5/00 - 2006 г.
19. Патент США. Acoustic condition sensor employing a plurality of mutually non-orthogonal waves. № 5.854.450, G08C 21/00; G09G 5/00 – 1998 г.
20. 3M Touch Systems. Dispersive Signal Touch Technology, Technology Profile, 2008. – p.4.
21. S. Reis, V. Correia, M. Martins, G. Barbosa, R. M. Sousa, G. Minas, S. Lanceros-Mendez, J. G. Rocha. Touchscreen based on acoustic pulse recognition with piezoelectric polymer sensors // 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 516-520, 2010.
22. 3M Touch Systems. Touch Technology Brief. Projected Capacitive Technology, 2013. - p.8.

Додаток А

Сенсорний екран					
4-провідний	5-провідний	Ємнісний	Проекційно-ємнісний	ПАХ	ІЧ - технологія
<p>Переваги: висока точність визначення точки дотику, можна активувати будь-яким предметом, стійкість до пилу, вологи, низька вартість.</p> <p>Недоліки: прозорість до 75%, мала механічна міцність, недовговічність, неможливість вимірювання сили натискання, відсутність Multi-touch.</p>	<p>Переваги: висока точність визначення точки дотику, можна активувати будь-яким предметом стійкість до пилу, вологи, низька вартість.</p> <p>Недоліки: прозорість до 85%, мала механічна міцність, недовговічність, неможливість вимірювання сили натискання, відсутність Multi-touch.</p>	<p>Переваги: висока точність, прозорість до 90%, висока надійність, висока роздільна здатність.</p> <p>Недоліки: необхідність тільки провідним предметом, складність компонентів, висока вартість виробництва, неможливість вимірювання сили натискання, відсутність Multi-touch.</p>	<p>Переваги: прозорість до 90%, висока точність, довговічність, Multi-touch, вимір сили натискання, висока роздільна здатність.</p> <p>Недоліки: складність компонентів, необхідність дотику тільки провідним предметом, висока вартість виробництва.</p>	<p>Переваги: прозорість до 95%, висока точність, довговічність, Multi-touch, не вимагають перекалібрування, вимір сили натискання, висока роздільна здатність, невисока вартість виробництва.</p> <p>Недоліки: чутливість до забруднення відображаючих елементів, боїться шуму і вібрацій, вимагає дотику предметом, який обов'язково поглинає акустичні хвилі.</p>	<p>Переваги: 100% прозорість, можливість використання будь-якого предмета, Multi-touch, довговічність.</p> <p>Недоліки: висока вартість, необхідність регулярно проводити чистку оптичних елементів, негативний вплив прямих сонячних променів, мала точність, роздільна здатність, неможливість вимірювання сили натискання.</p>

2701 RSU IntelliTouch Controller

Напруга живлення і струм:

- +5 В, номінальний (+4.75 В до +5,25 В постійного струму);
- Робочий струм 75mA. Потужність становить 300 мВт при 5 В;
- Пусковий струм до 600 мА протягом 50 мс;
- Мінімальний струм живлення 200 мА;
- Сумарні завади повинні бути менш 100 мВ (peak-to-peak) для частот нище 1 МГц, и менше 50 мВ (peak-to-peak) на частотах вище 1 МГц.

Послідовний інтерфейс:

- ОВОС 232E (RS-232), DCE конфігурації. 8 біт даних, 1 стоп біт, без парності, Full Duplex
- Апаратне підтвердження зв'язку: RTS / CTS

Швидкість передачі даних:

- 9600 (за замовчуванням) і 19200.

Інтерфейс USB:

- CTR-270100-IT-PCU-00R контролер.

Режими роботи:

- Повний IntelliTouchSmartSet протокол;
- Клієнтський протокол;
- Вихідний / Поточковий / Блокований режими.

Розширення:

- 4096x4096, незалежно від розміру екрану.

Час відгуку:

Близько 10 мс на обчислення координати.